

明 細 書

光変調器

技術分野

本発明は、光波の変調、光路の切り替え等の光制御素子に用いられる光変調器に関し、特に、光変調器を構成する基板上に凹部を有し、該凹部上に光の位相を制御する制御電極が形成された光変調器に関する。

背景技術

近年の高速、大容量の情報通信に係る需要の高まり対応して光通信が注目されており、中でも、電気光学効果を有する基板材料を用い、該基板内に光導波路を形成した光変調器は、広帯域周波数における光通信に適した光制御素子として広く知られている。

また、光変調器としては、特に、高密度波長多重（D W D M）化や高速通信化に適応するものとして、ニオブ酸リチウム（L N）などの電気光学効果を有する材料を用いたマッハツェンダー（M Z）型の外部光変調器（以下、L N光変調器という）を用いて、C W（Continuous Wave）レーザからの光を変調する光変調器が実用化されている。

M Z型の外部光変調器の構成としては、第1図に示すように、入力用の光導波路2から入力した光を、Y字型の分岐光

導波路 3 により 2 等分し、2 つの光導波路 4（制御電極である変調電極と接地電極が形成する電界の作用により、内部を伝播している光が位相制御を受ける光導波路。以下、光導波路作用部という）を導波された光を他の Y 字型分岐光導波路 5 により合波し、出力用の光導波路 6 を介して、変調光を外部に出射するように構成されている。そして、これらの各光導波路は、電気光学効果を有する基板 1 の表面に、Ti などの高屈折率材料を熱拡散することにより形成されている。第 1 図においては、光導波路の形状をわかり易く示すため、基板 1 上に形成されている変調電極、接地電極などの制御電極の図示は、省略されている。

近年では、このような光導波路を有する光変調器に関し、例えば、特開平 10-90638 号にリッジ構造を有する光導波路が開示されている。これは第 2 図に示すように、制御電極（変調電極 21、接地電極 20, 22）による光導波路 4 への電界作用を効率的に行うため、光導波路 4 の両側に凹部（溝）10, 11, 12 を形成することにより畝（リッジ）を設け、制御電極が形成する電界が、光導波路に集中的に作用するように構成することが提案されている。

なお、第 2 図は、第 1 図に示す MZ 型の光変調器を、一点鎖線 A において、光導波路作用部 4 に垂直な方向に該光変調器を切断した場合の断面図を示している。第 2 図に示す 7 は、SiO₂ などで形成されたバッファ層を示す。

しかしながら、第 2 図に示す光変調器においては、凹部 1

2 を跨いで接地電極 2 2 が形成されている。このため、長時間に渡る光変調器の駆動や光変調器へ入力する駆動パワーの増大などにより、接地電極などの制御電極部を中心に温度が上昇し、凹部 1 2 を形成する基板と凹部 1 2 上に形成された接地電極との熱膨張率の差により、凹部の側面を中心に接地電極による応力が集中し、該応力により基板内に応力歪が発生することとなる。このような応力歪は、光導波路を含む基板の屈折率を変化させることから、光変調器内の光導波路を通過する光の位相を安定的に制御する際に、大きな障害となる。

なお、このような応力集中による応力歪の発生は、上述した M Z 型光変調器に限らず、光変調器を形成する基板表面に凹部を形成し、該凹部を跨いで接地電極などの電極が形成されている場合に、共通して起きるものである。特に、凹部の近傍に光導波路が形成されている場合には、光変調制御に及ぼす応力歪の影響が顕著となる。

本発明の目的は、上述した問題を解決し、光変調器内の基板表面に形成された凹部に発生する応力を緩和し、光導波路を含む基板内の応力歪に起因する光変調制御の劣化を抑制し、長時間に渡る安定的駆動を実現した光変調器を提供することである。

発明の開示

上記課題を解決するために、請求の範囲第 1 項に係る発明

では、電気光学効果を有する材料からなる基板と、該基板上に設けられた光導波路と、該光導波路内を導波する光の位相を制御する制御電極とを有し、前記基板の制御電極を形成する面に凹部を設けた光変調器において、該凹部上に形成する前記制御電極に、応力緩和手段を設けることを特徴とする。

請求の範囲第1項に係る発明により、制御電極と基板との熱膨張率の差により、制御電極と基板との間に応力が発生する場合でも、凹部上に形成する制御電極には応力を緩和する手段を設けているため、特に、凹部の側面に集中する応力を抑制し、応力歪による光変調制御の不安定化を防止することが可能となる。

また、請求の範囲第2項に係る発明では、請求の範囲第1項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極の厚みを、凹部上以外の制御電極の厚みより薄く構成することを特徴とする。

さらに、好ましくは、請求の範囲第3項に係る発明では、該応力緩和手段は、該凹部の窪みの深さよりも薄く構成することを特徴とする。

請求の範囲第2項に係る発明により、凹部上の制御電極の厚みを、凹部上以外の制御電極の厚みより薄く構成するため、凹部上の制御電極自体が発生する熱膨張の応力を、該凹部上以外の制御電極のものより低く抑えることが可能となる。しかも、凹部上の制御電極の機械的強度が、該凹部上以外の制御電極より弱くなることにより、制御電極全体で発生する応

力歪を、凹部上の制御電極の機械的変形で吸収でき、基板表面に制御電極からの応力の伝達が緩和され、特に、凹部の側面に応力が集中的することを防止することが可能となる。

また、好ましくは、請求の範囲第3項に係る発明により、凹部上の制御電極の厚みを、該凹部の窪みの深さよりも薄く構成することにより、凹部上の制御電極が、凹部の側面に与える応力を、局所的かつ小さくすることができる。しかも、該凹部上の制御電極は、凹部の側面を形成する基板より、機械的強度がより低くなるため、凹部の側面に与える応力を一層抑制することが可能となる。

また、請求の範囲第4項に係る発明では、請求の範囲第2項又は第3項に記載の光変調器において、該凹部上の制御電極の厚みは、 $30000 \sim 500 \text{ \AA}$ であることを特徴とする。

請求の範囲第4項に係る発明により、凹部上の制御電極の厚みを 30000 \AA 以下、好ましくは、 20000 \AA 以下に抑えることにより、一般的な光変調器に利用される制御電極の厚み約 $20 \mu\text{m}$ やリッジ部の溝の深さは約 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ と比較しても、十分に厚みが薄いため、該凹部上の制御電極による凹部の側面に与える応力を十分に抑制することが可能となる。

また、凹部上の制御電極の厚みを 100 \AA 以上、好ましくは、 500 \AA 以上とすることにより、光変調器の製造プロセスで利用される成膜技術において、安定的に製造可能な導通線の膜厚以上の厚みを確保することが可能となる。

また、請求の範囲第5項に係る発明では、請求の範囲第1項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部を設けた基板面と該凹部上の制御電極との間に空間を形成することを特徴とする。

請求の範囲第5項に係る発明により、凹部を設けた基板面と該凹部上の制御電極との間に空間を形成され、基板面と制御電極とが接触していないため、該凹部の基板面、特に、凹部の側面に制御電極の応力が加わることが抑制される。

またさらに、該凹部を設けた基板面上の制御電極の厚さは、凹部上以外の該基板面上の制御電極よりも薄く構成することが好適であり、その厚さが $1 \sim 10 \mu\text{m}$ であるとなお良い。

また、請求の範囲第6項に係る発明では、請求の範囲第1項乃至第5項のいずれかに記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極を、ストライプ形状又は格子形状に形成することを特徴とする。

請求の範囲第6項に係る発明により、凹部上の制御電極の形状がストライプ形状又は格子形状を有するため、凹部上の制御電極が熱膨張した場合でも、該ストライプ形状又は該格子形状が形成する空間部分へも制御電極が膨張するため、凹部の側面に集中する応力を抑制することが可能となる。しかも、ストライプ形状又は格子形状を有している部分は、他の制御電極より機械的強度が弱いため、制御電極全体で発生する応力歪を、凹部上の制御電極の機械的変形で吸収でき、基板表面への制御電極からの応力の伝達が緩和される。さらに、

請求の範囲第2項乃至第5項のいずれかに記載の構成と組み合わせることにより、より効果的に凹部の側面への応力集中を抑制することが可能となる。

また、請求の範囲第7項に係る発明では、請求の範囲第1項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極が、該凹部に隣接する非凹部上に形成した制御電極を接続するための細線であることを特徴とする。

請求の範囲第7項に係る発明により、凹部に隣接する非凹部上に形成した制御電極を、細線で接続するため、凹部上の制御電極となる細線自体は、光変調に影響を与えるような応力をほとんど生じず、しかも、非凹部上に形成した制御電極に発生する応力も、凹部上で応力の伝搬が遮断されるため、凹部の側面に制御電極の応力が加わることが抑制される。

また、請求の範囲第8項に係る発明では、請求の範囲第1項乃至第7項のいずれかに記載の光変調器において、該基板は、基板表面に垂直な方向に、電気光学効果により最も効率的に屈折率を変更できる結晶軸の方向を有する基板であることを特徴とする。

光変調器の基板として、基板表面に垂直な方向に、電気光学効果により最も効率的に屈折率を変更できる結晶軸の方向を有する基板（以下、Zカット基板という）を用いる場合には、基板表面に垂直な方向に電界を印加する必要があることから、光導波路への電界作用を効果的に行うため、光導波路を挟むように両側に溝が形成される場合がある。請求の範囲

第 8 項に係る発明により、請求の範囲第 1 項乃至第 7 項のいずれかに記載するような、凹部上に形成する制御電極に応力緩和手段を設ける技術を、このような Z カット基板を有する光変調器に適用することで、より優れた特性を有する光変調器を提供することが可能となる。

また、請求の範囲第 9 項に係る発明では、請求の範囲第 1 項乃至第 8 項のいずれかに記載の光変調器において、該制御電極は、接地電極であることを特徴とする。

請求の範囲第 1 項乃至第 8 項のいずれかに記載するような、凹部上に形成する制御電極に応力緩和手段を設ける構成は、応力緩和手段の前後で、制御電極の抵抗値や形状が不連続的に変化するため、高周波のマイクロ波を伝播させた場合に反射や制御電極外への放射が起き易いため、該制御電極を変調電極とする場合には、光変調器の特性が劣化する可能性もある。このため、請求の範囲第 9 項に係る発明のように、応力緩和手段を設ける制御電極を、接地電極とすることにより、より優れた特性を有する光変調器を提供することが可能となる。

図面の簡単な説明

第 1 図は、マッハツェンダー型の光変調器を説明する図である。

第 2 図は、従来の光変調器の断面図である。

第 3 図は、本発明の第 1 の実施例を示す光変調器の断面図

である。

第 4 図は、本発明の第 2 の実施例を示す光変調器の断面図である。

第 5 図は、本発明の第 3 の実施例を示す光変調器の断面図である。

第 6 図は、本発明の第 4 の実施例を示す光変調器の断面図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明を好適例を用いて詳細に説明する。

光変調器を構成する基板としては、電気光学効果を有する材料、例えば、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3 ; 以下、 LN という)、タンタル酸リチウム (LiTaO_3)、 PLZT (ジルコン酸チタン酸鉛ランタン)、及び石英系の材料から構成され、特に、光導波路デバイスとして構成しやすく、かつ異方性が大きいという理由から、 LiNbO_3 結晶、 LiTaO_3 結晶、又は LiNbO_3 及び LiTaO_3 からなる固溶体結晶を用いることが好ましい。本実施例では、ニオブ酸リチウム (LN) を用いた例を中心に説明する。

また、光変調器の基板の結晶軸の方向としては、基板表面に垂直な方向に、電気光学効果により最も効率的に屈折率を変更できる結晶軸の方向を有する基板、所謂、 Z カット基板を用いる例を説明するが、本発明は、 Z カット基板に限定されるものではない。

光変調器を製造する方法としては、LN基板上にTiを熱拡散させて光導波路を形成し、次いで基板の一部又は全体に渡りバッファ層を設けずに、LN基板上に電極を直接形成する方法や、光導波路中の光の伝搬損失を低減させるために、LN基板上に誘電体SiO₂等のバッファ層を設け、さらにその上にTi・Auの電極パターンの形成及び金メッキ方法などにより数十μmの高さの変調電極及び接地電極を構成して、間接的に当該電極を形成する方法がある。

一般に、一枚のLNウェハに複数の光変調器を作り込み、最後に個々の光変調器のチップに切り離すことにより、光変調器が製造される。

本発明の実施例として、第1図に示すMZ型の光変調器を例に説明する。

1は、LN基板であり、上述のようにTi内部拡散等により、その基板表面に光導波路を形成している。2は入力光導波路であり、不図示のCWレーザ光源からの光が導光され、かつ偏光保持機能を有するファイバ（不図示）と接続されている。

入力光導波路2を伝播した光は第1の分岐光導波路である3dB分岐光導波路3にて等分割され、それぞれマッハツェンダー（MZ）型光導波路のアームを構成する光導波路作用部4に入る。

該光導波路作用部4の近傍には、不図示の変調電極及び接地電極からなる制御電極が配置され、変調電極に印加した信

号に応じて光導波路作用部 4 を伝播する光は位相変調を受ける。位相変調後、各導波光は、第 2 の分岐光導波路 5 において合波され、相互に干渉して強度変調された信号光を生成する。

信号光は、出力光導波路 6 を伝播し不図示の出力ファイバから光変調器モジュールの外部に取り出される。

なお、光導波路作用部 4 の近傍には、該光導波路作用部 4 を挟むように溝（図示せず）が形成され、光導波路作用部 4 の上に配置される変調電極及び接地電極が生成する電界が、該光導波路作用部 4 に集中的に作用するよう構成されている。溝の形成方法としては、 SiO_2 等のバッファ層を形成する前に、基板をエッチング又はサンドブラスト等で侵食・切削することにより形成する。

次に、本発明の特徴である凹部上の制御電極に設けられる応力緩和手段について説明する。

第 3 図から第 5 図は、第 1 図の一点鎖線 A において、本発明に係る光変調器を切断した場合の断面形状を示す図であり、第 4 図、第 5 図については、基板表面近傍の形状のみ図示している。

また、第 6 図（a）は、第 1 図の一点鎖線 A において、本発明に係る光変調器を切断した場合の断面形状の斜視図であり、第 6 図（b）（c）（d）は、凹部に形成された制御電極を LN 基板の上方から眺めた場合における、制御電極の形状を示すものである。

第 3 図に示す本発明の第 1 の実施例の特徴は、一つの接地電極を構成する 2 3, 2 4, 2 5 の各電極部分の厚みに関し、凹部 1 2 上の接地電極部分 2 4 の厚みを、凹部上以外の接地電極部分 2 3, 2 5 の厚みより薄く構成している。好ましくは、該凹部 1 2 の窪みの深さよりも薄く構成することにより、応力緩和効果を格段に高めることが可能となる。凹部 1 2 上の接地電極部分 2 4 の具体的な厚みとしては、30000 Å 以下、好ましくは、20000 Å 以下に抑えることにより、凹部上以外の接地電極部分 2 3, 2 5 の厚み（一般的な光変調器に利用される制御電極の厚み約数 20 μm）やリッジ部の溝の深さは約 10 μm と比較しても、十分に厚みが薄いため、該凹部上の接地電極部分 2 4 をはじめ接地電極部分 2 3, 2 5 に生じる応力が、凹部 1 2 の側面に集中することを十分に抑制することが可能となる。

また、凹部上の接地電極部分 2 4 の厚みを 100 Å 以上、好ましくは、500 Å 以上とすることにより、光変調器の製造プロセスで利用される成膜技術においても、接地電極部分が断線するなどの不具合を生じることが無く、安定的な光変調器の製造が可能となる。

第 3 図に示す接地電極部分 2 3, 2 4, 2 5 の製造方法としては、Ti・Au の電極パターンの形成後、接地電極部分 2 4 をフォトリジスト膜でマスクし、金メッキ方法などにより数十 μm の高さの接地電極部分 2 3, 2 5 を形成する方法や、電極パターンを形成後の金メッキ処理の途中で、接地電

極部分 24 をメッキ処理されないように処置し、その後、必要な高さまで接地電極部分 23, 25 を形成する方法、更には、金メッキ処理後、接地電極部分 23, 25 をフォトレジスト膜などで保護し、接地電極部分 24 を必要な深さまでエッチングする方法などがある。

第 4 図に示す本発明の第 2 の実施例の特徴は、凹部 12 と接地電極部分 26 との間に空間 30 を設けている。これにより接地電極が凹部 12 に直接的に接していないため、接地電極部分 23, 25, 26 に生じる応力が、凹部 12 の側面に影響を及ぼすことが無い。

第 4 図に示す上記接地電極部分の製造方法としては、電極パターンの形成前に、凹部 12 上にリフトオフ層を形成し、その後、電極パターン形成及び金メッキ処理等を行い、該リフトオフ層を除去することにより形成される。

第 5 図に示す本発明の第 3 の実施例の特徴は、接地電極部分 23 と 25 との間をリボンやワイヤーなどの細線形状の導線 27 で接続する。これにより、凹部 12 直接接する接地電極が無い場合、凹部 12 の側面は、接地電極に生じる応力の影響を受けることが無い。しかも、細線は柔軟性を備えているため、接地電極部分 23, 25 に生じた応力を、相互に伝搬させることが無い上、繰り返し応力が発生しても、金属疲労などにより細線 27 が断線することも無いなど、優れた効果も有している。

第 5 図に示す接地電極部分 23, 25, 27 の製造方法と

しては、電極パターン形成及び金メッキ処理により、接地電極部分 23, 25 を形成し、その後、ワイヤーボインディングなどで細線 7 を設置電極部分 23, 25 の各々に接続する。

第 6 図に示す本発明の第 4 の実施例の特徴は、凹部上の制御電極をストライプ形状又は格子形状とするものである。第 6 図 (a) は、凹部の長手方向に垂直な方向にストライプが形成されており、第 6 図 (b) は、該長手方向に対してストライプの形成方向を傾斜させたものである。また、第 6 図 (c) は、凹部上の制御電極を格子形状としたものであり、第 6 図 (d) は、前記長手方向に対して格子の形成方向を傾斜させたものである。

このようなストライプ形状又は格子形状を構成することにより、制御電極の熱膨張を、ストライプ形状や格子形状が有する空間部分で吸収し、凹部の側面に与える応力を低下させることが可能となる。また、ストライプ形状や格子形状の部分は、他の制御電極の部分より機械的強度が低いため、制御電極全体で発生する

応力歪を、該凹部上の制御電極の機械的変形で吸収でき、基板表面への制御電極からの応力の伝達が緩和される。

特に、第 6 図 (b) のようにストライプ形状を傾斜させることで、凹部の側面に対する垂直応力を緩和することが可能となる。

なお、第 6 図では、直線的な形状のものを示したが、波線などの曲線により形成することも可能である。さらに、スト

ライプ形状や格子形状の間隔は、一定間隔のものに限らず、例えば、制御電極で低い抵抗率が必要な部分では密に、高い低効率が必要な部分では疎となるように、間隔を変化させることも可能である。

凹部に形成する制御電極の空隙率と、光変調器の周波数特性との関係を調べると、表 1 のような結果が得られる。

Z カットの L N 基板の上に、T i 熱拡散により光導波路を形成し、その後、該基板表面に S i O₂ のパッファ層 0.5 μ m を形成した。

次に、深さ 5 μ m、幅 20 μ m の凹部をドライエッチングにより形成する。そして、制御電極として、下地層として T i 層及び A u 層を蒸着方法により形成した後、電極層として A u 層をメッキ法により、20 μ m の厚みの電極を形成した。このように形成した光変調器の断面図は第 2 図の形状を有している。

制御電極の空隙率の変化を調べるため、第 6 図 (a) に示すようなストライプ形状の間隔又は長さを変化させ、表 1 のように空隙率 0 ~ 100 % まで変化させた。

光変調器の周波数特性としては、バイアス点の温度特性と周波数の透過特性を計測した。バイアス点の温度特性試験では、0 °C から 70 °C まで変化する温度環境内において、光変調器の D C バイアス変化 (ドリフト) 量を計測した。評価方法として、ドリフト量が 2 V 以下のものを○、2 V から 5 V 以下のもの△、5 V より大きいもの×とした。

また、周波数の透過特性試験では、光変調器からの光出力を光出力検出器で測定し、リップルの発生状況を検査した。評価方法として、リップルがほとんど発生しないものを○、小さなリップルが発生するもの△、大きなリップルが発生するもの×とした。

【表 1】

凹部上の制御電極の空隙率と周波数特性との関係

空隙率 %	0	10	25	50	75	90	100
温度特性	×	△	○	○	○	○	○
透過特性	○	○	○	○	○	△	×

表 1 の結果より、空隙率が 10 ～ 90 % の範囲でバイアス点の温度特性や周波数の透過特性が良好であり、特に、空隙率が 25 ～ 75 % では、より好適な特性を実現することができる。

また、上述した第 6 図に例示した実施例 4 は、実施例 1 又は 2 と組み合わせて用いることにより、凹部の側面への応力をより効果的に抑制することも可能となる。

以上、本発明の実施例について説明したが、本発明は上述の実施例の範囲に限定されるものではなく、光変調器の制御電極に生じる応力が、基板に影響を与えることを防止するため、特に、基板の凹部の側面に集中する応力を除去するために、上述した技術的構成に替えて、当該技術分野において周

知の応力緩和手段を用いる場合も、本発明の範囲内に属するものである。

また、上述の実施例では、Zカット基板を用いたMZ型のLN光変調器を例に説明したが、電気光学効果を有する他の基板材料を用いた光変調器、他の形状の光導波路を有する光変調器に対しても、本発明が適用可能であることは言うまでもない。

さらに、本発明の応用として、上述した本発明の構成に加え、例えば、光導波路への電界の集中や基板外へのマイクロ波の漏洩防止を図るため、基板の裏面の一部を除去するなど、光変調器の各種の特性を改善するため、必要に応じて公知の技術を付加することもできることも、言うまでもない。

産業上の利用可能性

以上、説明したように、本発明の光変調器によれば、光変調器内の温度変化に起因して、基板と制御電極との間に発生する応力、特に、基板表面に形成された凹部に集中して作用する応力を緩和し、光導波路を含む基板内における応力歪による光変調制御の劣化を防止することが可能となる。

そして、長期間に渡り安定した駆動を実現する光変調器を提供することができる。

請 求 の 範 囲

1. 電気光学効果を有する材料からなる基板と、該基板上に設けられた光導波路と、該光導波路内を導波する光の位相を制御する制御電極とを有し、前記基板の制御電極を形成する面に凹部を設けた光変調器において、

該凹部上に形成する前記制御電極に、応力緩和手段を設けることを特徴とする光変調器。

2. 請求の範囲第1項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極の厚みを、凹部上以外の制御電極の厚みより薄く構成することを特徴とする光変調器。

3. 請求の範囲第1項又は第2項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極の厚みを、該凹部の窪みの深さよりも薄く構成することを特徴とする光変調器。

4. 請求の範囲第2項又は第3項に記載の光変調器において、該凹部上の制御電極の厚みは、 $30000 \sim 500 \text{ \AA}$ であることを特徴とする光変調器。

5. 請求の範囲第1項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部を設けた基板面と該凹部上の制御電極との間に空間を形成することを特徴とする光変調器。

6. 請求の範囲第1項乃至第5項のいずれかに記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極を、ストライプ形状又は格子形状に形成することを特徴とする光

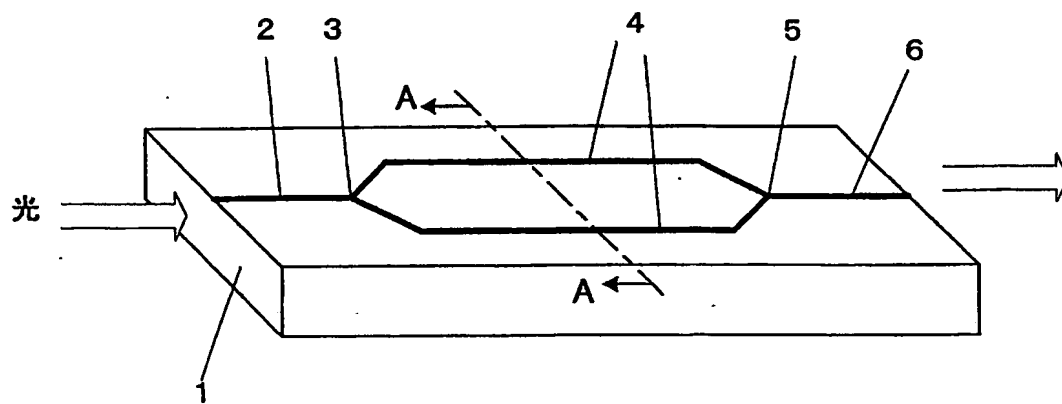
変調器。

7. 請求の範囲第1項に記載の光変調器において、該応力緩和手段は、該凹部上の制御電極が、該凹部に隣接する非凹部上に形成した制御電極を接続するための細線であることを特徴とする光変調器。

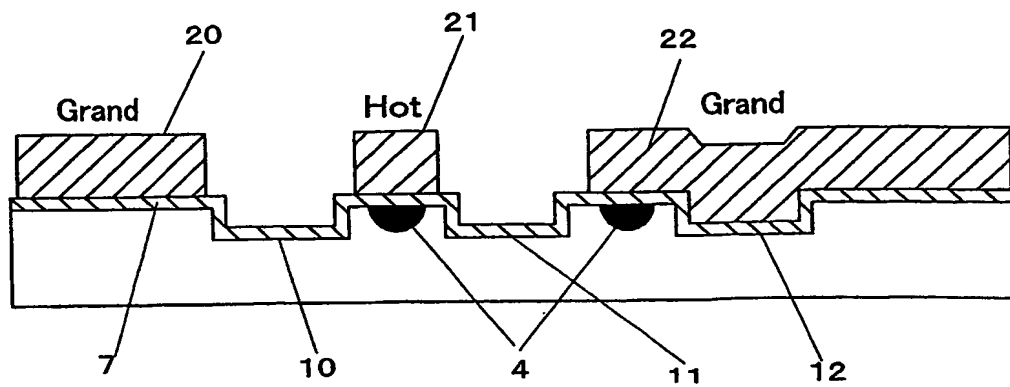
8. 請求の範囲第1項乃至第7項のいずれかに記載の光変調器において、該基板は、基板表面に垂直な方向に、電気光学効果により最も効率的に屈折率を変更できる結晶軸の方向を有する基板であることを特徴とする光変調器。

9. 請求の範囲第1項乃至第8項のいずれかに記載の光変調器において、該制御電極は変調電極と接地電極とからなり、前記応力緩和手段は接地電極に形成することを特徴とする光変調器。

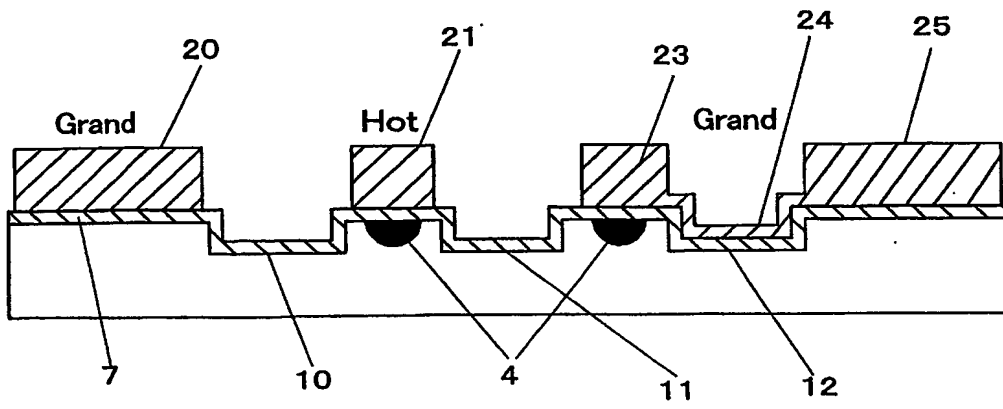
第1図



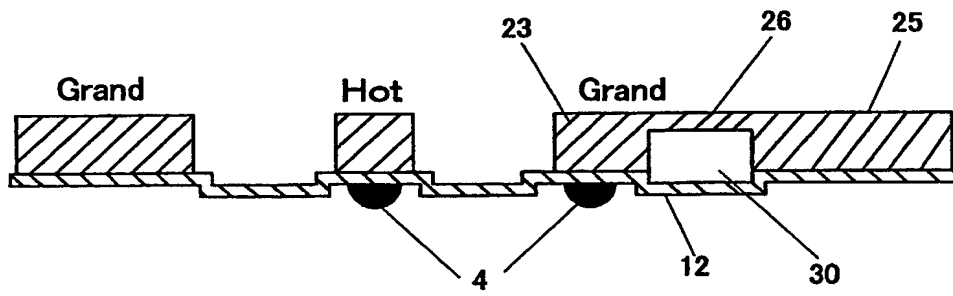
第2図



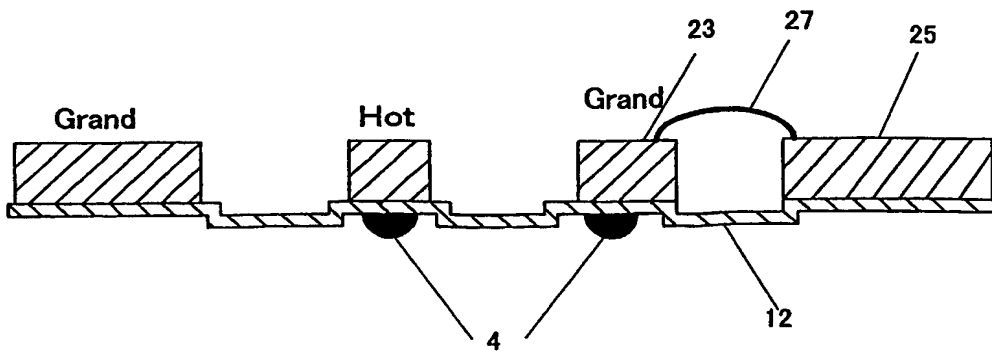
第3図



第4図



第5図



第 6 図

